Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 351-363

Optimization and Feasibility of Using Rainwater Harvesting Systems in Ardabil

H. Shokati[1*], Z. Sojoodi[2], M. Mashal[3]

Received: 11-11-2021 Revised: 22-11-2021 Accepted: 11-07-2022 Available Online: 22-09-2022	**How to cite this article:** Shokati H., Sojoodi Z., and Mashal M. 2022. Optimization and Feasibility of Using Rainwater Harvesting Systems in Ardabil. Journal of Water and Soil 36(3): 351-363. (In Persian with English abstract) **DOI:** 10.22067/JSW.2022.73460.1111

Introduction

Arid and semi-arid climates prevail in Iran. The precipitation is also sparsely distributed in most areas of the country. Therefore, there is a need for management measures to overcome the water crisis. One of these measures is designing rainwater harvesting systems that can meet some of the non-potable needs and reduce runoff in urban areas. The main components of rainwater harvesting systems in residential regions include the catchment area, storage tank, and water transfer system from the catchment area to the tank. The storage tank is the biggest investment in a rainwater harvesting system, as most buildings are not equipped with a storage system. Therefore, tank capacity should be determined optimally to minimize project implementation costs. The stored water volume and the project profit increases with increasing the tank volume. However, in this case, the price of the tank increases. Therefore, the tank capacity should be optimally designed to justify economic exploitation.

Materials and Methods

In order to evaluate the feasibility of using rainwater harvesting systems, the tanks' volume was optimized. Due to the higher rainfall of Ardabil relative to the average rainfall of the country, it is expected that this area has a good potential for the implementation of rainwater harvesting systems. Therefore, this region was selected as the study area under the scenario of a residential house with 100 and 200 m^2 catchment areas and four inhabitants. The amount of rainfall in the region is one of the primary parameters in determining the volume of rainwater collection tanks. Some of the precipitated water is always inaccessible due to evaporation from the surface. Nonetheless, since there is almost no sunlight during and immediately after rainfall, and also the received water enters the reservoirs shortly after precipitation, evaporation was assumed to be zero. Daily precipitation data for 42 years (from 1977 to 2019) were retrieved from the Ardabil Meteorological site. The daily water balance modeling method was used to analyze the rainwater harvesting systems due to the simplicity of interpretation, high accuracy and better general acceptance. Daily precipitation data were entered into this model and used as the primary source to meet the domestic demands. Simulation of rainwater harvesting systems was performed using daily precipitation data in MATLAB software, and the reliability of these systems was calculated for different tank volumes. Then, considering the price of drinking water and the current price of tanks in the market, the optimal volume of tanks was calculated using the Genetic Algorithm. Finally, the annual volume of water supply and the amount of water savings in case of using the optimal volumes of tanks were also estimated.

Results and Discussion

The results showed that the percentage of reliability is directly related to the volume of the tank, thus, the reliability percentage also increases with increasing the tank capacity. As the volume of the tank increases, the slope of the increasing reliability percentage decreases continuously, to the point that this slope becomes almost

1- Ph.D. Student in Irrigation and Drainage Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: hadi.shokati@ut.ac.ir)
2- Ph.D. Student in Water Science and Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Aburaihan College, University of Tehran, Tehran, Iran

zero. Comparing the reliability percentage obtained for 100 and 200 m^2 rooftops indicated that 200 m^2 rooftop had a higher reliability percentage than 100 m^2 rooftop due to receiving much more rainfall and meeting the water need for a longer duration. By comparing the results of overflow ratio for 100 and 200 m^2 rooftops, it can also be concluded that using a fixed size tank, the overflow in 200 m^2 rooftop is higher, which is due to receiving more water volume than 100 m^2 rooftop. The results also showed that by using a 5 m^3 tank, 44.5 and 24 m^3 of water can be stored annually from the 200 and 100 m^2 catchment areas, respectively, these are equal to 28 and 19 m^3, respectively, if 1 m^3 tank is used. The optimal tank volumes for 100 and 200 m^3 rooftops are equal to 0.59 and 1.66 m^3, respectively. Since the tanks are made in specific volumes, the obtained volumes were rounded to the closest volumes available in the market. Thus, a 1.5 m^3 tank was used for a 200 m^2 rooftop and a 0.5 m^3 tank was applied for a 100 m^2 rooftop.

Conclusion

Application of a tank of 0.5 m^3 for the rooftop of 100 m^2 was the most profitable for saving 17% of water consumption, annually. Moreover, the optimal tank volume for the 200 m^2 rooftop was selected to be 1.5 m^3, saving about 32 % of water consumption per year. Water-saving percentages indicate the high potential of our study area for the implementation of rainwater harvesting systems.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization, Reliability, Simulation

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص ۳۶۳-۳۵۱

بهینه‌سازی و امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در اردبیل

هادی شوکتی[1]* - زینب سجودی[2] - محمود مشعل[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

چکیده

ایران از لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود که از میزان بارندگی نسبتاً پایینی برخوردار است. از طرفی، توزیع این میزان بارندگی در کشور نیز مناسب نبوده و اغلب در سواحل دریای خزر و نیمه غربی تا جنوب غرب کشور رخ می‌دهد. این عوامل، لزوم انجام اقدامات مدیریتی در جهت غلبه بر بحران آب را به دنبال دارد. یکی از راهکارهای عملی در راستای مدیریت منابع آب، اجرای سامانه‌های استحصال آب باران می‌باشد که باید به صورت بهینه طراحی شوند تا سامانه توجیه اقتصادی داشته باشد. در این مقاله با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی سامانه‌های استحصال آب باران، داده‌های ۴۲ ساله بارش روزانه شهرستان اردبیل تحت سناریو یک خانه مسکونی با سطح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع و دارای چهار سکنه در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی سامانه در نرم‌افزار متلب انجام و قابلیت اطمینان مخازن و نسبت سرریز برای حجم‌های مختلف مخازن محاسبه شد. در نهایت، بهینه‌سازی حجم مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. نتایج نشان داد که برای پشت‌بام ۱۰۰ متر مربع، استفاده از مخزن ۰/۵ متر مکعبی بیشترین سودآوری را داشته و با نصب این مخزن، سالانه ۱۷ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین مخزن بهینه برای پشت‌بام ۲۰۰ متر مربع برابر با ۱/۵ متر مکعب انتخاب شد که با استفاده از آن می‌توان در هر سال حدود ۳۲ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. ارقام بدست آمده برای درصد صرفه جویی در مصرف آب حاکی از پتانسیل بالای شهرستان اردبیل برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان

مقدمه

ایران به لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌گردد که از میزان بارندگی نسبتاً پایینی برخوردار می‌باشد. از طرفی، توزیع این میزان بارندگی در کشور نیز مناسب نبوده و اغلب در سواحل دریای خزر و نیمه غربی تا جنوب غرب کشور رخ می‌دهد. این عوامل، لزوم انجام اقدامات مدیریتی در جهت غلبه بر بحران آب را به دنبال دارد. یکی از این اقدامات، طراحی سامانه‌های استحصال آب باران می‌باشد که می‌تواند علاوه بر تأمین بخشی از نیازهای غیرشرب خانوارها، موجب کاهش رواناب در سطوح شهری نیز گردد. اجزای اصلی سامانه‌های استحصال آب باران در مناطق مسکونی شامل سطح جمع‌آوری(آبگیر)، مخزن ذخیره و سیستم انتقال آب از سطح جمع‌آوری به مخزن می‌باشند. مخازن ذخیره‌سازی بیشترین سرمایه‌گذاری در سیستم جمع‌آوری آب باران را دربر می‌گیرند، زیرا اغلب ساختمان‌ها از ابتدا مجهز به سیستم ذخیره‌سازی نیستند. بنابراین حجم مخزن باید به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های اجرایی طرح، به صورت بهینه تعیین گردد. با افزایش حجم مخزن، حجم آب ذخیره شده و در نتیجه درآمد طرح افزایش می‌یابد، ولی از سویی دیگر، قیمت خرید مخزن نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین حجمی از مخزن که هم به لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه بوده و هم قابلیت ذخیره‌سازی بیشتری داشته باشد، نیازمند مطالعه می‌باشد. ظرفیت مخازن سامانه‌های استحصال آب باران را نمی‌توان فرموله کرد، زیرا به شدت تحت تأثیر متغیرهای مختلف محلی مانند بارندگی، سطوح آبگیر، تقاضا و تعداد ساکنین می‌باشد (Aladenola and Adeboye,

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: hadi.shokati@ut.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری علوم مهندسی آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.73460.1111

; Eroksuz and Rahman, 2010; Ghisi, 2010; Londra 2010 et al., 2015; Palla et al., 2012). مطالعات مختلفی در راستای بهینه‌سازی حجم مخازن در سرتاسر دنیا صورت گرفته است. مطالعات قبلی صورت گرفته، از روش های مختلفی برای طراحی مخزن بهینه استفاده کرده‌اند. برخی از این مطالعات از جمله لی و همکاران (Lee et al., 2000)، قیصی و همکاران (Ghisi et al., 2007) و استفن و همکاران (Steffen et al., 2013) معادلات رگرسیونی را توسعه دادند که استفاده از آن‌ها ساده می‌باشد، اما وابسته به داده‌های عددی بوده و بنابراین برای مناطق خاص به‌کار برده می‌شوند. علاوه بر تحقیقات مذکور، محققانی از جمله (Jones and Hunt, 2010)،(Assayed et al., 2013)،(Hanson and Voge, 2014)، (Wang and Zimmerman, 2015) و (Rostad et al., 2016) نیز تحقیقاتی را در زمینه محاسبه حجم بهینه مخازن استحصال آب باران صورت دادند. نتایج به‌دست آمده توسط این محققان، اغلب برای مناطق یا شهرهای خاص کاربرد داشته و به طور معمول، از داده‌های بارش محلی برای بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. فیوکس (Fewkes, 1999) به بررسی پتانسیل سامانه‌های استحصال آب باران برای مصارف خانگی در انگلستان پرداخت و مجموعه‌ای از منحنی‌های بدون بعد را برای طراحی تولید کرد که می‌توان براساس آن‌ها، حجم بهینه مخازن آب باران را با توجه به مساحت پشت‌بام و الگوهای تقاضای آب محاسبه کرد. لیاو و تسا (Liaw and Tsai, 2004) منحنی‌هایی را بوجود آوردند که با استفاده از آن‌ها می‌توان اندازه بهینه مخازن را انتخاب کرد که دارای سطح اطمینان بوده و همچنین تابع هزینه را به حداقل برساند. مهرآبادی و ثقفیان (Mehrabadi and Saghafian, 2012) به منظور بهینه‌سازی ابعاد مخازن در شهر تهران، ابتدا پارامترهای هیدرولوژیکی منطقه را مورد بررسی قرار داده و بر اساس آمار بارندگی یک دوره زمانی مشخص و برای تأمین درصدی از نیاز غیرشرب منازل، یک رابطه مشخص برای حجم مخزن تعریف کردند و بهینه‌سازی حجم مخازن را بر اساس میزان ورودی‌ها و خروجی‌ها به کمک برنامه کامپیوتری انجام دادند. طبق نتایج بدست آمده در این تحقیق، در مناطقی که بارندگی با توزیع زمانی مناسب دارند، می‌توان به بیشترین درصد تأمین نیاز غیرشرب ساکنین با ابعاد بهینه مخازن دست یافت به نحوی که ساخت آن‌ها هم توجیه اقتصادی داشته باشد. لوندرا و همکاران (Londra et al., 2015) به منظور تعیین حجم بهینه مخازن آب باران، از دو روش بیلان روزانه آب[1] و روش تقاضای دوره خشک[2] برای ۷۵ منطقه یونان استفاده کردند تا ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از کل نیازهای آب خانوارهای ۳ تا ۵ نفره را تأمین کنند. مقایسه این دو روش نشان داد که روش تقاضای دوره خشک، به جز در موارد اندک، حجم مخازن را کوچک‌تر محاسبه می‌کند. همچنین نتیجه گرفتند که ظرفیت مخازن آب باران به شدت تحت تاثیر متغیرهای مختلف محلی قرار می‌گیرد و نمی‌توان آن را به صورت فرمول درآورد. شوکتی و همکاران (Shokati et al., 2020) در تحقیقی با هدف بررسی پتانسیل استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در اقلیم‌های مختلف ایران، چهار شهر رشت، ساری، تبریز و یزد را به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب کردند. قابلیت اطمینان مخازن ذخیره‌سازی و نسبت سرریز برای حجم‌های مختلف مخازن، بررسی شد. نتایج نشان داد که به ازای یک حجم ثابت مخزن، قابلیت اطمینان مخازن آب باران در رشت بیشتر از سایر مناطق بوده که دلیل این امر مقدار بارش بیشتر این شهر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که شهر یزد به دلیل قرارگیری در منطقه گرم و خشک از پتانسیل پایینی برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران برخوردار است.

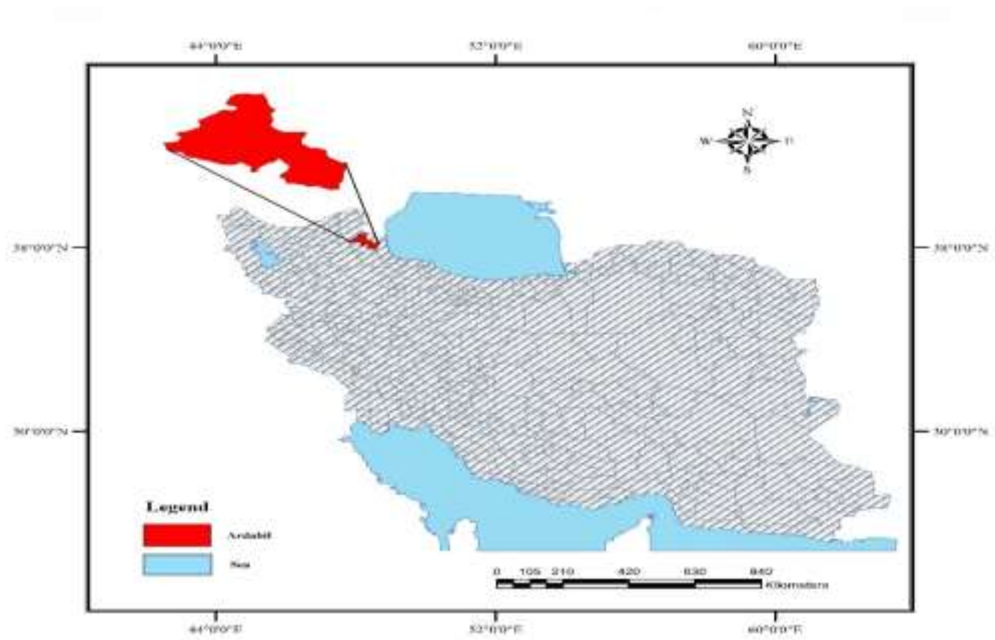
در این مقاله سعی گردید تا با هدف امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران، به بهینه‌سازی حجم مخزن سامانه‌های مذکور پرداخته شود. بدین منظور، شهرستان اردبیل تحت سناریوی یک خانه مسکونی با سطح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع با چهار سکنه، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. شبیه‌سازی سامانه‌های استحصال آب باران با استفاده از داده‌های بارش روزانه و در محیط نرم‌افزار متلب[3] انجام و قابلیت اطمینان[4] سامانه‌های مذکور در ازای استفاده از حجم‌های مختلف مخزن برآورد گردید. سپس با توجه به قیمت آب شرب و قیمت رایج مخازن در بازار، حجم بهینه مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک[5] محاسبه شد. در نهایت، حجم سالانه تأمین آب و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب در صورت استفاده از حجم‌های بهینه مخازن برآورد گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

با توجه به حجم بارندگی نسبتاً بالاتر شهرستان اردبیل نسبت به بارندگی متوسط کشور، انتظار می‌رود که این شهرستان پتانسیل خوبی برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران داشته باشد. لذا این شهرستان به عنوان منطقه مورد مطالعه در این تحقیق درنظر گرفته شد. شهرستان اردبیل در طول جغرافیایی ۴۸،۳۰ و عرض جغرافیایی ۳۸،۲۴ قرار دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهرستان اردبیل را نشان می‌دهد.

1- Daily Water Balance Method
2- Dry Period Demand Method
3- Matlab
4- Reliability
5- Genetic Algorithm



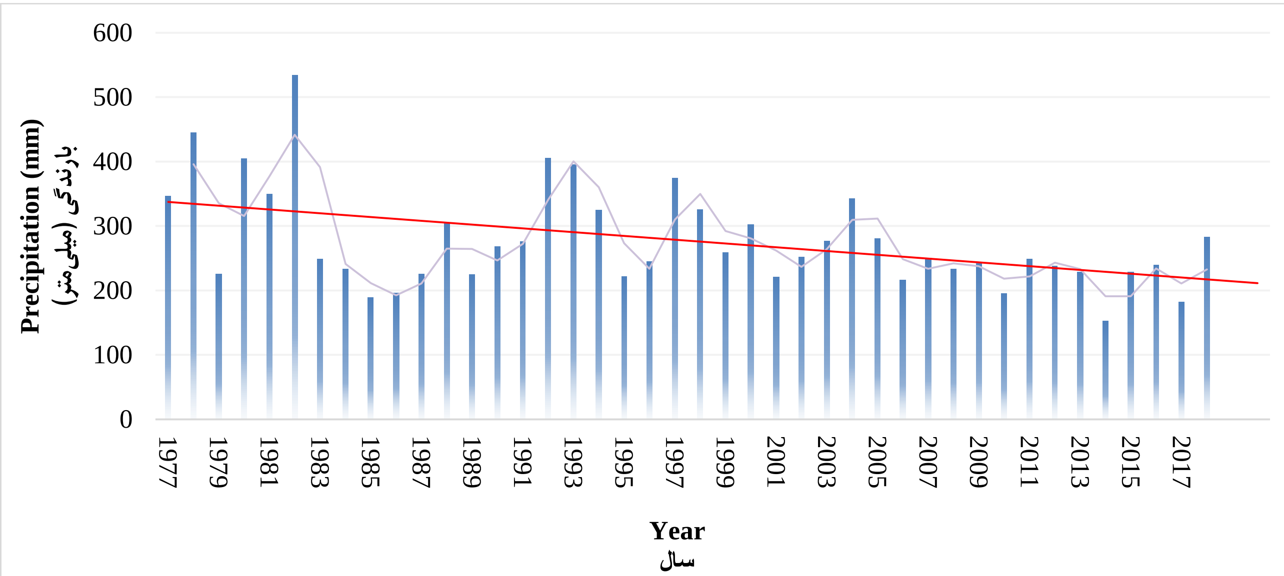
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Geographical location of the study area

الزامات اولیه طراحی سامانه‌های استحصال آب باران

تهیه اطلاعات بارندگی

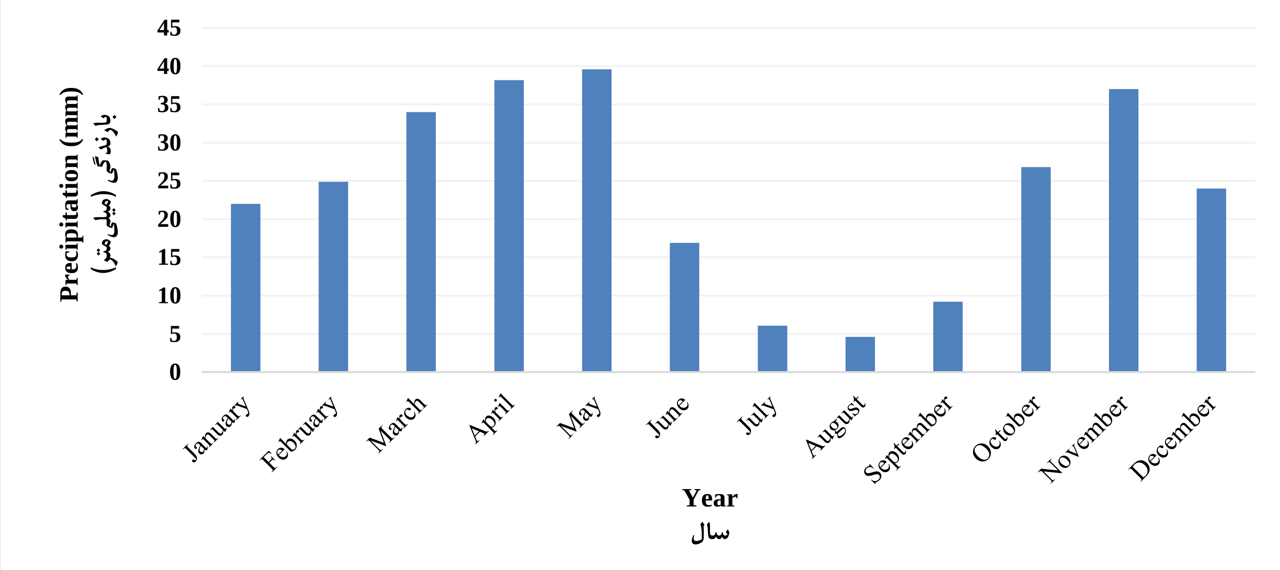
میزان بارش منطقه، از پارامترهای اساسی در تعیین حجم مخازن جمع‌آوری آب باران می‌باشد. در این تحقیق، از داده‌های بارش روزانه دوره ۴۲ ساله (۱۳۹۷-۱۳۵۶) ایستگاه هواشناسی اردبیل استفاده گردید. شکل ۲ میزان بارش سالانه در این ایستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات بارش این ایستگاه، متوسط بارش سالانه در طول ۴۲ سال مورد بررسی برابر با ۲۷۸ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نمودار میانگین متحرک بارش در شکل ۲ مشاهده می‌شود که روند بارش در طول ۴۲ سال اخیر کاهشی بوده است.



شکل ۲- روند بارش سالانه شهرستان اردبیل

Figure 2- Annual precipitation trend of Ardabil city

شکل ۳ میانگین ماهانه بارش شهرستان اردبیل را در بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهد. همواره مقداری از بارش به دلیل تبخیر از سطح از دسترس خارج می‌گردد، اما با توجه به اینکه میزان بارش در ماه‌های گرم سال بسیار کم بوده (شکل ۳)، و همچنین با توجه به اینکه حین بارش و بلافاصله بعد از بارش، تقریباً تابش آفتاب وجود ندارد و آب دریافتی بلافاصله بعد از بارش وارد مخازن می‌گردد، لذا در این تحقیق فرض گردید که تبخیر از سطح برابر با صفر می‌باشد.



شکل ۳- میانگین بارش ماهانه شهرستان اردبیل (میلی‌متر)

Figure 3- Average monthly rainfall in Ardabil city (mm)

تعیین حجم تقاضای آب

یکی از اطلاعات اساسی مورد نیاز در طراحی سامانه‌های استحصال آب باران، برآورد میزان تقاضای داخلی آب می‌باشد. این میزان تقاضا را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود:

$$D_t = N \times d_t \quad (۱)$$

در این معادله، D مجموع تقاضای داخلی آب (لیتر)، N تعداد سکنه و d سرانه مصرف آب (لیتر) می‌باشد. جدول ۱ سرانه مصرف آب کشور را بدون احتساب فضای سبز نشان می‌دهد.

محاسبه مجموع تقاضای داخلی با توجه به تغییرپذیری پارامترهای معادله مربوطه در طول زمان و از فردی به فرد دیگر پیچیده می‌باشد. با وجود همه این تفاوت‌ها در مصرف، باید میزان میانگین مصرف روزانه آب را برآورد کرد. در این مطالعه، سرانه آب غیرشرب مورد نیاز به طور متوسط ۸۰ لیتر در روز بر اساس مطالعه قبلی توسط مهرآبادی و همکاران (Mehrabadi *et al.*, 2013) و برای چهار سکنه در نظر گرفته شد.

مدل‌سازی مخازن سامانه‌های استحصال آب باران

تاکنون روش‌های مختلفی برای آنالیز سامانه‌های استحصال آب باران ارائه شده است که از بین تمامی این روش‌ها، روش مدل‌سازی بیلان روزانه آب به دلیل سادگی تفسیر، دقت بالا و نیز پذیرش عمومی بهتر، انتخاب مناسب‌تری می‌باشد (Bashar *et al.*, 2018). داده‌های بارش روزانه وارد این مدل شده و به عنوان منبع اولیه برای تأمین تقاضای ساکنین بکار گرفته می‌شوند. از این مدل در تحقیقات گذشته از جمله مهرآبادی و همکاران (Mehrabadi *et al.*, 2013)، امتیاز و همکاران (Imteaz *et al.*, 2014) و جینگ و همکاران (Jing *et al.*, 2017) نیز استفاده شده است. در این مدل، اگر در یک روز خاص، بارش باران به تنهایی قادر به تأمین تقاضای داخلی نباشد، از آب شهری نیز به عنوان مکمل استفاده می‌شود. مدل‌سازی سامانه استحصال آب باران در محیط نرم افزار متلب صورت می‌گیرد. به منظور مدل‌سازی سامانه‌های مذکور، حجم آب استحصالی از سطح آبگیر در هر روز به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

جدول ۱- سرانه مصرف آب بدون احتساب فضای سبز (Office of Research and Technical Criteria, 1992)

Table 1- Average per capita water consumption excluding green space

نوع مصرف (Type of use)	سرانه مصرف آب (لیتر در روز) (Average per capita water consumption (L/day))
آشامیدن (Drinking)	2-5
پخت و پز (Cooking)	5-10
حمام (Bathroom)	25-50
لباسشویی (Laundry)	10-20
شستن ظرف (Dish washing)	5-15
توالت (Toilet)	20-30
شستن خانه (Washing the house)	3-10
تهویه (Ventilation)	2-5
سایر (Other)	3-5
مجموع (Total)	75-150

تعیین حجم رواناب از سطوح آبگیر

تعیین حجم آب هدایت شده در مخزن، از پارامترهای مهم در برآورد حجم بهینه مخازن می‌باشد. حجم آب استحصالی از سطح آبگیر در هر روز با رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Mehrabadi *et al.*, 2013):

$$I_t = R_t \times A \times \emptyset \qquad (۲)$$

در این معادله، I حجم روزانه رواناب قابل استحصال(لیتر)، R عمق روزانه بارش(میلی‌متر)، A مساحت سطح آبگیر(متر مربع) و $\emptyset$ ضریب رواناب (بدون بعد) می‌باشد. ضریب رواناب برای فصول مختلف سال براساس تحقیق قبلی صورت گرفته توسط دستورانی (Dastorani, 2018) برابر با ۰/۷۵ و ۰/۶۸ درنظر گرفته شد.

حجم آب موجود در مخزن در هر روز با استفاده از رابطه بیان می‌شود (۱۹):

$$V_t = I_t + V_{t-1} - O_t - SP_t \qquad (۳)$$

در این معادله، V_t حجم ذخیره آب مخزن در روز t (لیتر)، I_t حجم آب باران استحصال شده از سطح آبگیر در روز t (لیتر)، V_{t-1} حجم ذخیره آب در مخزن در روز t-1 (لیتر)، O_t حجم آب خروجی از مخزن برای تأمین نیاز غیرشرب ساکنین در روز t (لیتر) و SP_t حجم سرریز از مخزن در روز t (لیتر) می‌باشد.

حجم سرریز

اگر حجم آب هدایت شده به مخزن بیشتر از حجم مخزن باشد، آب اضافی سرریز شده که حجم این سرریز با رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$SP_t = I_t + V_{t-1} - V_{max} - O_t \qquad (۴)$$

در این رابطه، V_{max} حجم مخزن بر حسب لیتر می‌باشد.

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان بیانگر توانایی سامانه استحصال آب باران در پاسخگویی به تقاضای ساکنین می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Imteaz et al., 2012):

$$Re = \frac{N-U}{N} \times 100 \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، U تعداد روزهایی از سال که نیاز غیرشرب ساکنین تأمین نمی‌شود و N تعداد روزهای سال می‌باشد.

بهینه‌سازی حجم مخزن

بهینه‌سازی عبارت است از تعیین مقادیر ورودی یک مسئله و پردازش آن‌ها در راستای دستیابی به حداقل یا حداکثر خروجی. ورودی‌ها همان متغیرهای تصمیم بوده و خروجی‌ها نیز هزینه و یا

شایستگی مربوطه می‌باشند. فرآیند پردازش با ارزیابی توابع هزینه، هدف و یا شایستگی انجام می‌گیرد. با توجه به ماهیت فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی در این تحقیق، در فرآیند مدل‌سازی از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش‌های تکاملی، از دقت بالایی در حل مسائل مختلف برخوردار بوده و توسط محققین زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. چنان‌چه مسئله بهینه‌سازی یک تابع هدف داشته باشد و هدف حداکثر یا حداقل نمودن آن تابع باشد، بهینه‌سازی از نوع تک هدفه خواهد بود. در این تحقیق، تابع هدف مسئله، تک هدفه بوده و هدف آن بیشینه‌سازی سود می‌باشد. بنابراین باید کلیه جریان‌های نقدی سالانه طرح براساس یک نرخ تنزیل از قبل تعیین شده، به سال صفر(سال آغاز اجرای طرح) تنزیل گردد. بدین منظور، درآمدها و هزینه به کمک شاخص ارزش کنونی خالص (NPV)[1] به سال صفر تبدیل شده و حجمی از مخزن که بیشترین NPV را داشته باشد، به عنوان حجم بهینه مخزن انتخاب می‌گردد. تابع هدف مسئله به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^{T} \frac{B_t}{(1+i)^t} \qquad (۶)$$

در این معادله، IC هزینه اولیه خرید مخزن، Bt سود سالانه طرح، t سال مورد نظر و i نرخ بهره می‌باشد.

با توجه به هدف تحقیق که برای تأمین آب غیرشرب هست، لذا نیازی به سیستم انتقال و توزیع آب به داخل ساختمان نبوده و از آب ذخیره شده می‌توان در مصارفی همچون فضای سبز، شستن حیاط، ماشین و ... استفاده کرد. بنابراین در این تحقیق هزینه اجرای طرح عمدتاً مربوط به هزینه خرید مخزن می‌باشد که فقط در سال اول پرداخت می‌شود، در حالی که درآمد پروژه مربوط به ذخیره آب می‌باشد که تا پایان طول عمر سامانه در هر سال حاصل می‌شود. با توجه به روند افزایش سالانه قیمت آب، درآمد حاصل از پروژه نیز افزایش خواهد یافت. قیمت آب(درآمد) در سال مورد نظر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$B_t = B_0 \times (1+g)^t \qquad (۷)$$

که در آن، B_0، قیمت آب در سال اول و g درصد افزایش سالانه قیمت آب می‌باشد. در این تحقیق، نرخ بهره ۱۲ درصد و طول عمر سامانه براساس طول عمر پیش‌بینی شده در کاتالوگ شرکت‌های سازنده مخازن برابر با ۴۰ سال در نظر گرفته شد. همچنین قیمت آب با توجه به قیمت فعلی و با لحاظ افزایش پلکانی قیمت آن برابر با ۱۵۰۰ تومان و درصد افزایش سالانه قیمت آن نیز با توجه به درصد افزایش قیمت آب در سال‌های قبل ۲۵ درصد درنظر گرفته شد. قیمت مخازن براساس قیمت‌های درج شده در کاتالوگ شرکت‌های فروشنده و مطابق جدول ۲ درنظر گرفته شدند.

قیدها

در فرآیند بهینه‌سازی تابع هدف مسئله، قیودی نیز به شرح زیر اعمال گردید:

قید مربوط به حجم سرریز که بیان می‌کند حجم سرریز باید کمتر از حجم بارندگی می‌باشد و به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$0 \le SP_t < I_t \qquad (۸)$$

قید مربوط به حجم آب موجود در مخزن در هر زمان که بیان می‌کند این حجم نمی‌تواند از حجم مخزن بیشتر و از حجم آب باقی‌مانده از روز قبل کمتر باشد.

$$V_{t-1} \le V_t \le V_{max} \qquad (۹)$$

نتایج و بحث

نتایج قابلیت اطمینان

شکل ۴ نتایج درصد قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران را برای شهرستان اردبیل و در ازای استفاده از مخازن با حجم‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که درصد قابلیت اطمینان رابطه مستقیمی با حجم مخزن دارد، به طوری که با افزایش حجم مخزن، درصد قابلیت اطمینان نیز افزایش می‌یابد. با افزایش حجم مخزن، پیوسته از شیب روند افزایشی درصد قابلیت اطمینان کاسته می‌شود، تا جایی که این شیب تقریبا برابر با صفر می‌گردد. این نتیجه با نتایج تحقیقات مهرآبادی و همکاران (Mehrabadi *et al.*, 2013)، بشار و همکاران (Bashar *et al.*, 2018) و لانی و همکاران (Lani *et al.*, 2018) مطابقت دارد.

همچنین با مقایسه مقادیر درصد قابلیت اطمینان به دست آمده برای پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مترمربع، مشاهده می‌شود که پشت‌بام ۲۰۰ متری به دلیل دریافت حجم بارش بیشتر نسبت به پشت‌بام ۱۰۰ متری، درصد قابلیت اطمینان بیشتری داشته و در درصد بیشتری از روزهای سال قادر به تأمین نیاز غیرشرب ساکنین خواهد بود، به طوری که با استفاده از یک مخزن ۵ متر مکعبی، در حدود ۳۰ درصد از روزهای سال می‌تواند این نیاز را برطرف کند که این میزان در پشت‌بام ۱۰۰ متر مربعی برابر با ۱۳ درصد است.

نتایج سرریز از مخزن

شکل ۵ نتایج نسبت سرریز از مخازن را در شهرستان اردبیل برای پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع نشان می‌دهد. نسبت سرریز بیانگر حجم سرریز از مخزن نسبت به کل حجم آب دریافتی می‌باشد که با

1- Net Present Value

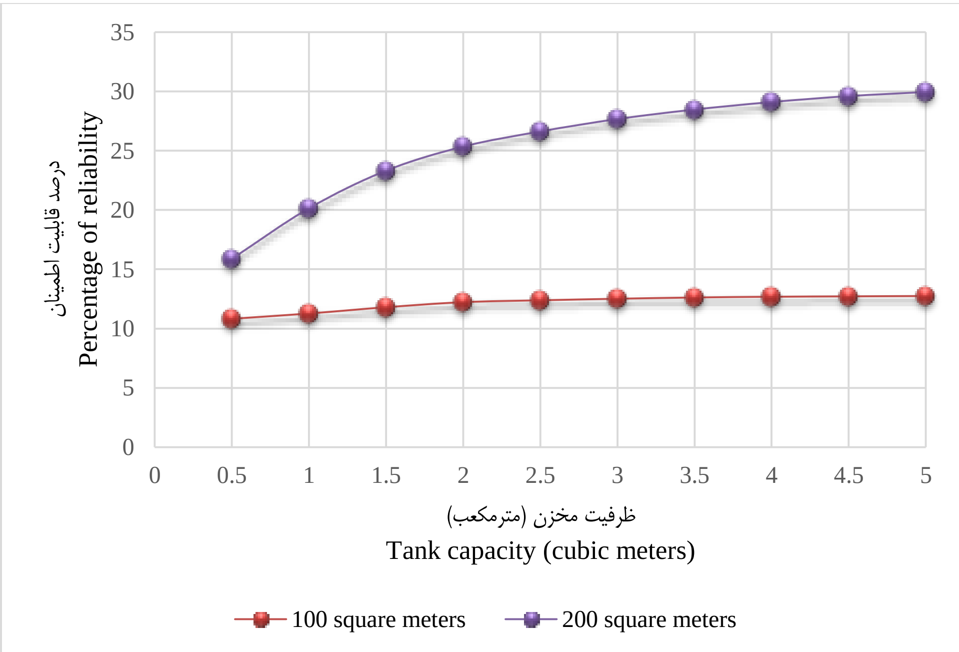
افزایش حجم مخزن، این نسبت کاهش می‌یابد. دلیل این امر، گنجایش بیشتر مخازن حجیم می‌باشد که موجب می‌شود آب بیشتری در اختیار ساکنین قرار گیرد. با توجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش حجم مخزن، نسبت سرریز از مخزن روند نزولی پیدا می‌کند که این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات بشار و همکاران (Bashar *et al.*, 2018) و لانی و همکاران (Lani *et al.*, 2018) همخوانی دارد. با مقایسه نتایج نسبت سرریز برای پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مربع، مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از یک مخزن ثابت، نسبت سرریز در پشت‌بام ۲۰۰ متر مربع بیشتر بوده که به دلیل دریافت حجم آب بیشتر نسبت به پشت‌بام ۱۰۰ متر مربع می‌باشد.

شکل‌های ۶ و ۷ حجم سالانه سرریز از پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع را برای حجم‌های مختلف مخزن نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، مشاهده می‌شود که با افزایش حجم مخزن، میزان سرریز کاهش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ با نمودار میزان بارش (شکل ۲) مشاهده می‌گردد که حجم سرریز با میزان بارش رابطه مستقیم داشته و روند تغییرات آن مشابه تغییرات میزان بارش می‌باشد.

جدول ۲- قیمت مخازن (R27www)

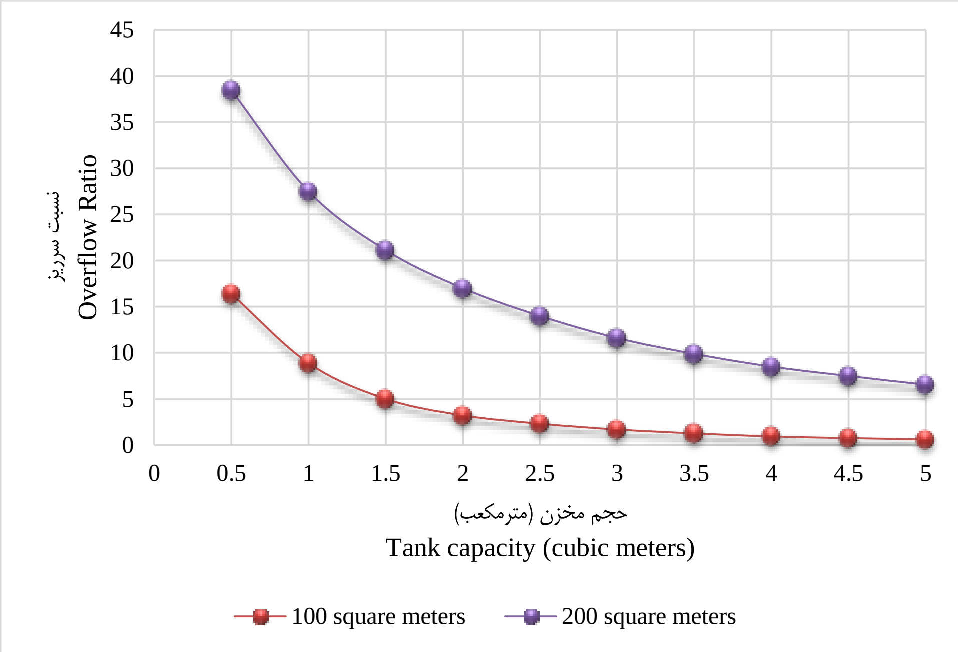
Table 2- Tank prices

حجم مخزن (متر مکعب) (Tank capacity (m^3))	قیمت (ریال) (Price (Rials))
0.5	13070000
1	24660000
1.5	37400000
2	47600000
2.5	60670000
3	72260000
3.5	85330000
4	102150000
4.5	115220000
5	137230000



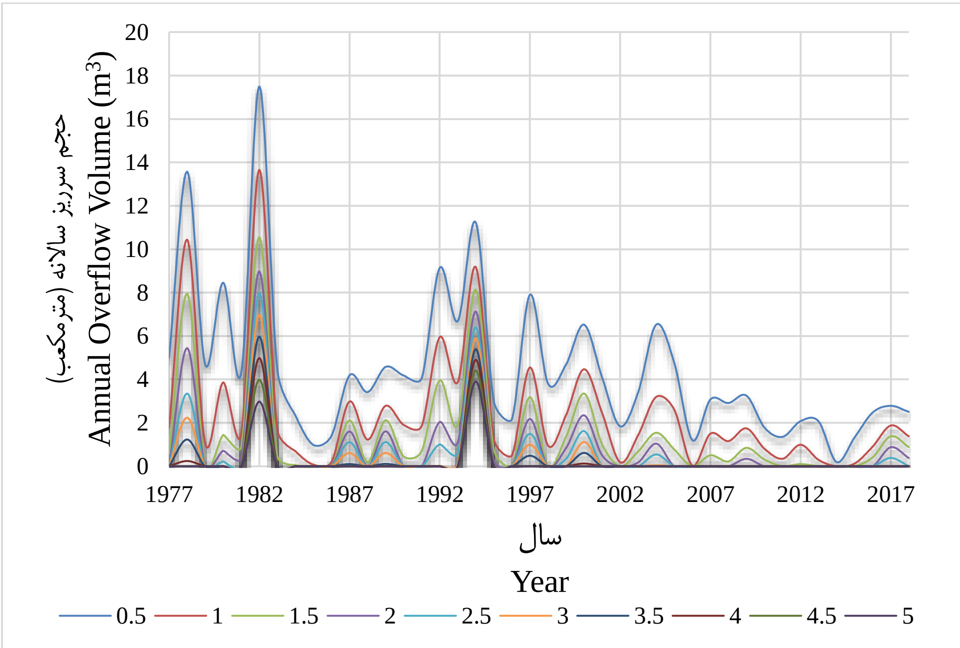
شکل ۴- نتایج قابلیت اطمینان مخزن

Figure 4- Results of tank reliability



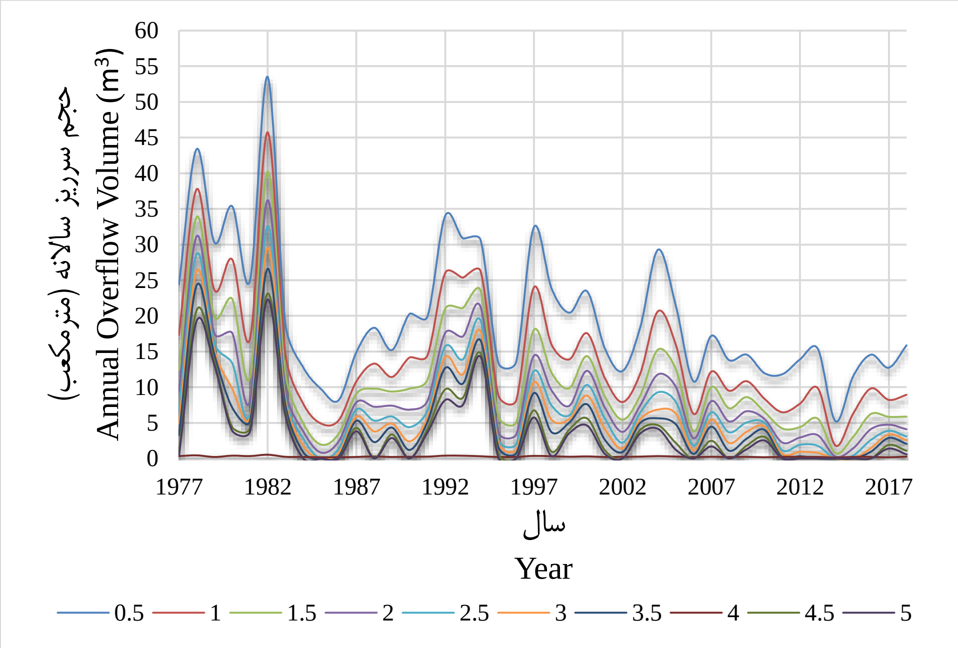
شکل ۵- نتایج نسبت سرریز مخزن

Figure 5- Results of tank overflow ratio



شکل ۶- حجم سالانه سرریز از پشت‌بام ۱۰۰ مترمربعی در ازای حجم‌های مختلف مخزن

Figure 6- Annual overflow volume from the rooftop of 100 m^2 for different tank volumes

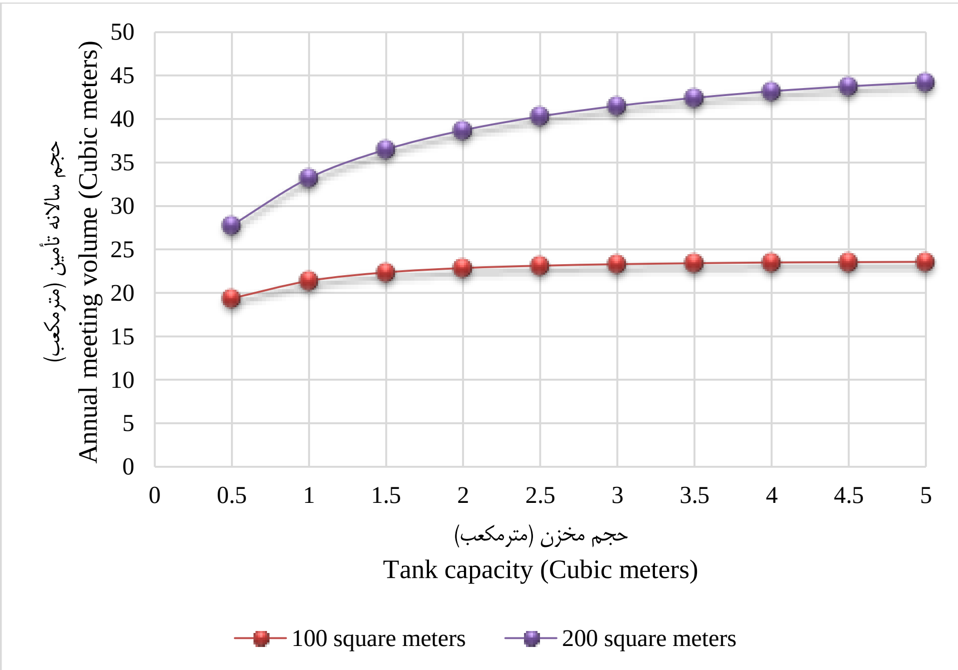


شکل ۷- حجم سالانه سرریز از پشت‌بام ۲۰۰ متر مربعی در ازای حجم‌های مختلف مخزن

Figure 7- Annual overflow volume from the rooftop of 200 m^2 for different tank volumes

حجم آب تأمین شده سالانه

شکل ۸ حجم سالانه تأمین آب را در ازای استفاده از مخازن با حجم‌های مختلف برای دو سطح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربعی نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که به ازای یک تقاضای ثابت، با افزایش مساحت سطح آبگیر، حجم تأمین آب نیز افزایش می‌یابد. با استفاده از مخزن ۵ متر مکعبی می‌توان سالانه از سطح آبگیر ۲۰۰ و ۱۰۰ مترمربعی به ترتیب ۴۴/۵ و ۲۴ متر مکعب آب ذخیره‌سازی نمود که در صورت استفاده از مخزن ۰/۵ متر مکعبی این میزان به ترتیب برابر با ۲۸ و ۱۹ مترمکعب خواهد بود.



شکل ۸- حجم سالانه تامین نیاز آب شرب

Figure 8- Annual volume of meeting the potable water demands

نتایج بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی حجم مخزن، ابتدا رابطه‌ای بین حجم مخـزن و حجم آبی که آن مخزن در صورت استفاده می‌تواند تأمین کند، ایجـاد شد. سپس قیمت مخزن (هزینه) و قیمت آب قابل ذخیـره توسـط آن (درآمد) با لحاظ طول عمر سامانه و افزایش سالانه قیمـت آب و نـرخ بهره مقایسه شدند. در نهایت، با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محـیط نرم‌افزار متلب و با توجه به قیود و روابط ذکر شده در بخش‌های قبلی، بهینه‌ترین حجم‌های مخزن انتخاب شدند. جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی حجم مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد کـه در آن حجم‌های بهینه برای سطوح آبگیـر ۱۰۰ و ۲۰۰ مترمربـع بـه ترتیـب برابر با ۰/۵۹۲ و ۱/۶۶۴ مترمکعب بدست آمدند، اما با توجه به این‌که مخازن در حجم‌های مشـخص و معـین سـاخته مـی‌شـوند، بنـابراین حجم‌های به دست آمده به نزدیک‌ترین حجم‌های موجود در بازار گرد شده‌اند. بدین ترتیب، برای پشـت‌بـام ۲۰۰ متـر مربـع از مخـزن ۱/۵ مترمکعب و برای پشت‌بام ۱۰۰ متر مربع از مخـزن ۰/۵ متـر مکعـب استفاده خواهد شد که با استفاده از این مخازن بـرای پشـت‌بـام‌هـای ۲۰۰ و ۱۰۰ متر مربع، سالانه به ترتیب ۳۲ و ۱۷ درصد در مصرف آب غیرشرب ساکنین صرفه‌جویی خواهد شـد. ارقـام بدسـت آمـده بـرای درصد صرفه جویی در مصرف آب حاکی از پتانسیل بالای شهرستان اردبیل برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران است.

جدول ۳- نتایج بهینه سازی حجم مخزن

Table 3- Tank volume optimization results

مساحت پشت‌بام (Rooftop area)	100 m^2	200 m^2
حجم بهینه (متر مکعب) (Optimal volume)	0.592	1.664
حجم قابل خرید (متر مکعب) (Purchasable volume)	0.5	1.5
درصد صرفه‌جویی (Percentage of savings)	17	32

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارزیابی عملکرد سامانه‌های استحصال آب بـاران در شهرستان اردبیـل در ازای اسـتفاده از حجـم‌هـای مختلـف مخـزن و پشت‌بام‌های با مساحت‌های مختلف مـورد مطالعـه قـرار گرفـت و در پایان، حجم بهینه مخـزن کـه بیشـترین سـودآوری را داشـته باشـد، انتخاب شد. بر این اساس، نتایج نشان داد که برای پشت‌بام ۲۰۰ متر مربعی، استفاده از مخزن ۱/۵ متر مکعبی بیشترین سودآوری را داشته و با نصب این مخزن، سالانه ۳۲ درصد در مصـرف آب صـرفه‌جـویی خواهد شد. همچنین حجم بهینه مخزن برای پشت‌بام ۱۰۰ مترمربعی برابر با ۰/۵ مترمکعب بدست آمد که با استفاده از آن می‌توان سـالانه حدود ۱۷ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کـرد. ارقـام بدسـت آمـده نشان از پتانسیل بالای شهرستان اردبیـل بـرای اجـرای سـامانه‌هـای استحصال آب باران می‌باشد.

منابع

1. Aladenola O.O., and Adeboye O.B. 2010. Assessing the potential for rainwater harvesting. Water Resources Management 24(10): 2129-2137. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y.
2. Assayed A., Hatokay Z., Al-Zoubi R., Azzam S., Qbailat M., Al-Ulayyan A., Bushnaq S., and Maroni R. 2013. On-site rainwater harvesting to achieve household water security among rural and peri-urban communities in Jordan. Resources, Conservation and Recycling 73: 72-77. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.010.
3. Bashar M.Z.I., Karim M.R., and Imteaz M.A. 2018. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: A comparative study within six major cities of Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling 133: 146-154. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.025.
4. Dastorani M.T. 2018. Quantitative and qualitative study of water that can be harvested in residential houses. P.551-562. 7th National Conference on Rainwater Harvesting systems, 20-21 Feb. 2019. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian). https://scwmwh.areeo.ac.ir/article_14647.html.
5. Eroksuz E., and Rahman A. 2010. Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. Resources, Conservation and Recycling 54(12): 1449-1452. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.010.
6. Fewkes A. 1999. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. Building and Environment 34(6): 765-772. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00063-8.
7. Ghisi E., Bressan D.L., and Martini M. 2007. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. Building and Environment 42(4): 1654-1666. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.007.
8. Ghisi E. 2010. Parameters influencing the sizing of rainwater tanks for use in houses. Water Resources Management 24(10): 2381-2403. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9557-4.

9. Hanson L.S., and Voge R.M. 2014. Generalized storage–reliability–yield relationships for rainwater harvesting systems. Environmental Research Letters 9(7): 075007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/075007.
10. Imteaz M.A., Adeboye O.B., Rayburg S., and Shanableh A. 2012. Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. Resources, Conservation and Recycling 62: 51-55. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.007.
11. Imteaz M.A., Matos C., and Shanableh A. 2014. Impacts of climatic variability on rainwater tank outcomes for an inland city, Canberra. International Journal of Hydrology Science and Technology 4(3): 177-191. https://doi.org/10.1504/ijhst.2014.067730.
12. Jing X., Zhang S., Zhang J., Wang Y., and Wang Y. 2017. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. Resources, Conservation and Recycling 126: 74-85. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027.
13. Jones M.P., and Hunt W.F. 2010. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. Resources, Conservation and Recycling 54(10): 623-629. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.002.
14. Lani N.H.M., Syafiuddin A., Yusop Z., and bin Mat Amin M.Z. 2018. Performance of small and large scales rainwater harvesting systems in commercial buildings under different reliability and future water tariff scenarios. Science of The Total Environment 636: 1171-1179. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.418.
15. Lee K.T., Lee C.D., Yang M.S., and Yu C.C. 2000. SW-soil and water: probabilistic design of storage capacity for rainwater cistern systems. Journal of Agricultural Engineering Research 77(3): 343-348. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0597.
16. Liaw C.H., and Tsai Y.L. 2004. Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 40(4): 901-912. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01054.x.
17. Londra P.A., Theocharis A.T., Baltas E., and Tsihrintzis V.A. 2015. Optimal sizing of rainwater harvesting tanks for domestic use in Greece. Water Resources Management 29(12): 4357-4377. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1064-1.
18. Mehrabadi M.H.R., and Saghafian B. 2012. Optimization of reservoirs of residential houses in cities. P. 1-9. Proceeding of 9th *International Congress on Civil Engineering*, 8-10 May. 2012. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian). https://civilica.com/doc/165886/.
19. Mehrabadi M.H.R., Saghafian B., and Fashi F.H. 2013b. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. Resources, Conservation and Recycling 73: 86-93. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.015.
20. Mehrabadi M.H.R., Saghafian B., and Sadeghian M.S. 2013a. Evaluation of the performance of rooftop surfaces of residential buildings in meeting the non-potable needs of residents in coastal cities of the country. Water Resources Engineering 6(19): 1-16. (In Persian with Engliah abstract). https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=213763.
21. Office of Research and Technical Criteria, Principles and Criteria for Designing Urban Water Supply Projects, Journal 3-117, Planning and Budget Organization. 1992.
22. Palla A., Gnecco I., Lanza L.G., and La Barbera P. 2012. Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. Resources, Conservation and Recycling 62: 71-80. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.006.
23. Rostad N., Foti R., and Montalto F.A. 2016. Harvesting rooftop runoff to flush toilets: Drawing conclusions from four major US cities. Resources, Conservation and Recycling 108: 97-106. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.009.
24. Shokati H., Kouchakzadeh M., and Fashi F.H. 2020. Assessing reliability of rainwater harvesting systems for meeting water demands in different climatic zones of Iran. Modeling Earth Systems and Environment 6(1): 109-114. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00662-3.
25. Steffen J., Jensen M., Pomeroy C.A., and Burian S.J. 2013. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in US cities. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 49(4): 810-824. https://doi.org/10.1111/jawr.12038.
26. Wang R., and Zimmerman J.B. 2015. Economic and environmental assessment of office building rainwater harvesting systems in various US cities. Environmental Science & Technology 49(3): 1768-1778. https://doi.org/10.1021/es5046887.
27. www.makhzaneab.com.